

Geologische Aspekte und Umfeldanalyse zur überregionalen Rohstoffverfügbarkeit von Beton – Sand, Kalkstein, Gips

Christoph Hilgers und Ivy Becker

Zusammenfassung

Die hohe Nachfrage an Beton stellt Herausforderungen an die Bauindustrie und Infrastrukturplanung. Dabei kann ein kontinuierlich steigender Bedarf, in Deutschland gleichermaßen wie global, verzeichnet werden, der das Ergebnis einer wachsenden Bevölkerung und steigenden ökonomischen Wohlstandes ist. Die Ausgangsrohstoffe für Beton, wie Kalk- und Tonsteine, Sande und Kiese, sowie Gips und Anhydrit, verzeichnen dabei eine höhere jährliche Wachstumsrate als die steigende Bevölkerung (2,4 % zu 1,2 % in 2017), weshalb Strategien zu einer globalen Sicherung der Bereitstellung geschaffen werden müssen. Aus geologischer Sicht ist keine Limitierung dieser Massenrohstoffe in Sicht, allerdings wird die Verfügbarkeit durch politische, ökonomische, gesetzliche und Umweltaspekte sowie Unterschiede in der regionalen Verteilung begrenzt. Auch in Deutschland sind die Baurohstoffe in abbauwürdigen Mengen vorhanden. Viele dieser Vorkommen sind aber durch vorrangige Flächennutzung verplant oder in privatem Besitz, wodurch es bei steigender Bautätigkeit zu regionaler Rohstoffknappheit kommt, da Neueröffnungen von Abbauf Flächen oder Erweiterungen langjährige Genehmigungsverfahren mit sich ziehen. In Zukunft werden sich dadurch auch Baurohstoffe verteuern, da lange Transportstrecken bei heutigen Preisen nicht wirtschaftlich sind. Gleichzeitig werden Recycling-Baustoffe eine immer größere Rolle spielen, um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden.

1 Einleitung

Beton ist weiterhin der vorwiegend eingesetzte Baustoff. Deshalb nimmt die Sicherung einer On-Demand Bereitstellung der für die Herstellung benötigten Massenrohstoffe eine tragende Rolle in der Bauindustrie und Infrastrukturplanung ein, wobei auch überregionale Zulieferer steigende Bedeutung erlangen. Er wird mit Wasser aus Sand und Kies sowie Zement angemischt (z. B. [1]). Für den Zement werden gemahlene Kalksteine und Tone oder Mergel sowie unterschiedliche Zuschlagstoffe wie Sand, Gips, Hütensande und Flugasche bei ca. 1450 °C gebrannt, wobei aus dem Karbonat (CaCO_3) und den Tonen und Mergeln verschiedene Calciumsilikate, -aluminat, der Branntkalk (CaO) und Kohlenstoffdioxid gebildet werden.

Die global wachsende Weltbevölkerung und deren zunehmender ökonomischer Wohlstand haben einen weiterhin wachsenden Energie- und Rohstoffverbrauch zur Folge [41]. Von einem konstanten Rohstoffverbrauch oder einer Kreislaufwirtschaft ist die globale Ökonomie noch weit entfernt [18]. Vielmehr nimmt die globale Materialeffizienz seit dem Wirtschaftsaufstieg Chinas und der Produktionsverlagerung aus materialeffizienten Ländern wie Deutschland, Japan oder Korea in weniger materialeffiziente Ökonomien wie China, Indien und Asien seit der Jahrtausendwende ab (UNEP 2016:16) [48]. Zudem führt

anthropogener Druck durch eine wachsende Weltbevölkerung und zusätzlich wachsenden Wohlstands zunehmend auch zu Engpässen bei der globalen und auch nationalen Rohstoffverfügbarkeit von Massenrohstoffen.

Bei der Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit müssen neben der geologischen Verfügbarkeit der Massenrohstoffe für Beton auch andere Kontrollfaktoren, die zu deren Bereitstellung beitragen, berücksichtigt werden. In diesem Beitrag tragen wir ausgewählte Aspekte des globalen und nationalen Bedarfs der Massenrohstoffe Sand und Kies, Kalkstein und Gips zusammen. Wir zeigen an Beispielen auf, wie sich die quantitative und qualitative Verfügbarkeit dieser Massenrohstoffe an der Schnittstelle Geologie, Technologie und Politik verändert. Hierzu werden unterschiedliche Einflussfaktoren anhand einer Umfeldanalyse in Anlehnung an eine PESTLE-Analyse dargestellt [24]. Dazu werden neben den naturwissenschaftlichen Aspekten einige ausgewählte politische (P=political), ökonomische (E=economic), rechtliche (L=legal) und ökologische (E=environmental) Aspekte dargestellt, um externe (Risiko)-Faktoren bei der Rohstoffverfügbarkeit einzubeziehen. Der Beitrag erhebt aufgrund der umfassenden Thematik keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern beabsichtigt einen Ein- und Überblick in das komplexe Themengebiet der Massenrohstoffe zu liefern.

2 Geologische Verfügbarkeit

2.1 Reserven, Ressourcen, Geopotential

Die ökonomische Gewinnung der geologisch verfügbaren Massenrohstoffe ist eng mit den technologischen Entwicklungen bei der Exploration und Produktion von Rohstoffen gekoppelt. Entsprechend ändern sich die Volumina der bekannten, derzeit technisch förderbaren und wirtschaftlich abbaubaren *Reserven*. Kommt es zu höheren Preisen und wurden technische Innovationen entwickelt, die beispielsweise den Abbau in bisher nicht förderwürdigen Tiefen oder als Beiprodukt ermöglichen, werden ungenutzte, bekannte Lagerstätten rentabel und somit steigt das Volumen unserer bekannten Reserven. Damit einher geht eine entsprechende Änderung der Volumina der *Ressourcen*. Ressourcen bezeichnen die bekannten Lagerstätten, die zum Teil noch nicht geologisch voll erfasst, und die nach heutiger Technik nicht wirtschaftlich abgebaut werden können. Durch Innovation kann also eine Ressource zu einer Reserve werden.

Neben den Reserven und Ressourcen ist das Geopotential eine schlecht erfassbare Kenngröße. Das Geopotential sind die Lagerstätten, die derzeit noch unbekannt sind, und durch neue Explorationsaktivitäten und neue Technologien entdeckt werden (z. B. [14]). Zahlreiche Gebiete der Erde sind noch nicht oder nicht nach neuesten Standards exploriert, und daher das Lagerstättenpotential nicht vollständig bekannt. Dies beinhaltet sowohl kontinentale als auch marine Lagerstättenpotentiale. Durch die Exploration unbekannter Gebiete und die neue Bewertung bekannter Gebiete mit neuesten Technologien werden auch zukünftig neue Geopotentiale erkannt und als neue Ressourcen und Reserven erfasst. Die *geologischen* Ressourcen der Massenrohstoffe für Beton sind global und in Deutschland auf lange Zeit in ausreichender Menge nach den derzeitigen Qualitätsstandards verfügbar.

Im Folgenden wird der Bedarf und die zugrundeliegenden Volumina der geologischen Verfügbarkeit dargestellt.

2.2 Bedarf

Der Rohstoffverbrauch steigt mit der seit 1970 etwa verdoppelten Weltbevölkerung von derzeit 7,7 Mrd. Menschen mit einer jährlichen Zunahme von ca. 83 Mio. Menschen, was in etwa der Gesamtbevölkerung Deutschlands entspricht [47], kontinuierlich an. Die globale Bevölkerungszunahme verringerte sich von 2,1 % in 1969 auf 1,2 % in 2017, aber das nahezu lineare Wachstum wird sich weiter fortsetzen [22,47]. Der durchschnittliche globale Wohlstand per capita steigt stärker als das globale Bruttoinlandsprodukt mit derzeit 3,2 % (Stand 2017) [57] und geht mit einem globalen steigenden Rohstoffverbrauch einher.

Krausmann et al. [17,19] differenzieren den Rohstoffverbrauch und zeigen für den Zeitraum 1973 bis 2002, dass der per capita Verbrauch von Biomasse sank (1,2 % Zunahme), fossile Energien konstant blieben (1,4 %), aber Erze und Industriemineralien (2,1 %) sowie vor allem Baurohstoffe mit 2,4 %/Jahr (3,5 t/per capita/Jahr) stärker zunahm als die Weltbevölkerung. Insbesondere durch das wirtschaftliche Wachstum von China und anderen unterentwickelten Ländern liegt seit 2002 der Rohstoffverbrauch aller Rohstoff-Sparten wieder über dem Bevölkerungswachstum (Biomasse 2,1 %, fossile Energien 2,6 %, Erze 5,7 %, mineralische Rohstoffe 4,0 % [19]). Dabei kann der Anstieg der Baurohstoffe in Europa und den USA mit dem Bevölkerungswachstum, in den anderen Ländern mit dem Wachstum des BIP korreliert werden [23].

In ihrem Ausblick für 2060 geht die OECD von einem weiterhin starken Wachstum des Baustoffsektors (Sand, Kies, Kalkstein, Gips, Ton, Natursteine) um 97 % von derzeit 44 Mrd. t (2017) auf 86 Mrd. t (2060) aus (OECD 2018:123, 124) [33]. Dabei nimmt die Entkopplung des erwarteten globalen Wirtschaftswachstums (+224 %) vom Rohstoffverbrauch (+97 %) von derzeit 5,8 (2017) auf 8,4 t/per capita/Jahr (2016) weiter zu (OECD 2018: 124, 128) [33].

Angaben zu Produktion, Reserven und Ressourcen von Rohstoffen im Baustoffsektor sind in vielen Ländern nicht richtig erfasst und großen Unsicherheiten unterworfen [z. B. 23, 19]. So wird beispielsweise die Produktion von Gips in China, dem mit Abstand größten Massenrohstoffproduzenten, innerhalb eines Jahres mit 15,5 Mio. t (USGS 2019:75, Stand 2017) [46] und 130 Mio. t (USGS 2018:77, Stand 2016) [45] angegeben. Trotz dieser variablen Bewertung sind die Massenrohstoffe Sand, Kies, Kalkstein und Gips für die Bauindustrie weltweit weit verbreitet und eine generelle geologische Knappheit aufgrund geologischen Rohstoffmangels ist nicht absehbar (USGS 2019:43) [46].

2.2.1 Gips

Die kontinuierlich ansteigende, globale Produktion von Gips beträgt 260 Mio. t im Jahr, wovon alleine 50 % in China gewonnen werden (USGS 2018:75, Stand 2017) [45]. An globalen, bekannten Reserven werden mehr als 1,8 Mrd. t angenommen (USGS 2018:75, Stand 2017) [45], die globalen Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 4 Mio. t Gips und Anhydrit pro Jahr abgebaut [5], davon über 1 Mio. t/a aus 17 Betrieben in Baden-Württemberg [20]. Neben natürlichen Lagerstätten steigt der Anteil von Gips aus Industrieabfällen, insbesondere durch die Rauchgasentschwefelung (REA-Gips) in Kohlekraftwerken. Der Anteil synthetischen Gipses am Bedarf beträgt in den USA ca. 50 % [45], in Deutschland werden 6,7 Mio. t/a REA-

Gips produziert [58]. In Deutschland werden bei der Zementherstellung etwa 1,5 Mio. t Gips und Anhydrit als Erstarrungsregler eingesetzt, wovon knapp 20 % durch den Sekundärrohstoff REA-Gips gedeckt werden [50]. Der REA-Gips wird fast vollständig für die Baustoffindustrie, insbesondere der Gipsbaustoffindustrie, verwendet [59].

Ein Ende der Kohlekraftwerke in Deutschland bedingt einen Ersatz der derzeitigen Gipsmassen (5,1 Mio. t aus Braunkohle-, 1,6 Mio. t aus Steinkohlekraftwerken) durch eine signifikante Steigerung der Produktion aus natürlichen Lagerstätten und die Erhöhung der Recyclingrate.

Das globale Handelsvolumen an Gips (HS92:2520) [27] stieg von 1995 (541 Mio. USD) auf 1,29 Mrd. USD 2017, Hauptexporteure sind Thailand (26 %), der Oman (13 %) und Deutschland (11 %) [34,38]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Handelsvolumen von knapp 128 Mio. USD (Stand 2017) [34].

2.2.2 Kalkstein

Die globale Produktion von Kalkstein nimmt kontinuierlich zu und betrug 2018 knapp 425 Mio. t [39]. Da die Produktion von Kalkstein nicht in allen Ländern akkurat erfasst wird, schlägt die EU (2007:55) zur Ableitung der globalen Kalkstein-Fördermengen einen Faktor von 1,19 je Tonne Portlandzement vor. Die globalen Reserven und Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 53 Mio. t Kalk- und Dolomitstein pro Jahr abgebaut [6]. Allein zur Zementherstellung importiert Deutschland 2,1 Mio. t Kalkstein und exportiert 0,27 Mio. t [5]. Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 steigt auch der Kalksteinverbrauch [51].

Das globale Handelsvolumen an Kalkstein (HS92:2521) [28] stieg von 1995 (174 Mio. USD) auf 815 Mio. USD in 2017, Hauptexporteure sind die Vereinigten Arabischen Emirate (35 %), Malaysia (11 %), die Philippinen (5 %) und der Oman (4,6 %) (Stand 2017) [34,38]. Deutschland ist Nettoimporteur von Kalkstein mit einem Warenwert von ca. 15 Mio. USD (Stand 2017) [34]. Ebenso stieg das Handelsvolumen von gebranntem Kalk (HS92:2522) global auf 949 Mio. USD im Jahr 2017, bei dem Deutschland als drittgrößter Exporteur einen Anteil von 8,6 % (82 Mio. USD) einnimmt, was einem Nettoexport von fast 30 Mio. USD (Stand 2017) entspricht [34].

2.2.3 Sand und Kies

Die globale Produktion von Sand und Kies allein für die Bauindustrie beträgt 30 bis 40 Mrd. t, insgesamt wird von einem Verbrauch von 40 bis 50 Mrd. t ausgegangen [49]. Da global der illegale Sand- und Kiesabbau signifikant ist, gibt die EU (2007:58) zur

Ableitung von Bausand und -kies Fördermengen aus der Zementproduktion mit einem Faktor von 6,09 je Tonne Zement an. Die globalen Reserven und Ressourcen sind groß und nicht detailliert erfasst. In Deutschland werden ca. 247 Mio. t Bausand und -kies pro Jahr produziert (Stand 2016) [6] und die Abbaugebiete sind grundsätzlich landesweit verbreitet (Abbildung 1). Von der Gesamtproduktion werden in Baden-Württemberg 37,9 Mio. t Sand gewonnen, davon knapp 1 % aus Sandstein (Mürbsand) [20]. Der Nettoexport Deutschlands bleibt wegen der hohen Transportkosten mit 11,6 Mio. t gering (Stand 2016) [6]. Durch die erhöhte Bauaktivität in Deutschland mit einem erhöhten Zementverbrauch von 4,8 % zwischen 2016 und 2017 [51] steigt auch der Verbrauch von Bausand und -kies.



Abb. 1: Verteilung von Bausand und Kiesvorkommen in Deutschland (verändert nach [12,13])

Zusätzlich werden in Deutschland ca. 9,9 Mio. t Industriesand produziert, wobei es sich in Deutschland fast ausschließlich um Quarzsande handelt (Stand 2016) [6,13]. Die globale Produktion von Industriesand beträgt 300 Mio. t (USGS 2019: 143, Stand 2018) [46]. Global und insbesondere in den USA ist in den letzten Jahren ein exponentieller Anstieg des Bedarfs zu verzeichnen. Etwa 25 % der globalen Produktion werden als Fracking-Sand in den USA verwendet (USGS 2019: 143, Stand 2018) [46].

Das globale Handelsvolumen an Sand (HS92:2505) [29] stieg von 1995 (741 Mio. USD) auf 1,23 Mrd. USD im Jahr 2017 [34]. Hauptexporteure sind Deutschland mit einem Anteil von 12 %

(149 Mio. USD), die Niederlande (11 %), Australien (11 %) und die USA (7,2 %). Hauptimporteure sind Belgien/Luxemburg (11 %), die Niederlande (9,3 %), Singapur (6,6 %) und Mexico (6,4 %) [34]. Von den 1,23 Mrd. USD hatten Natursande aller Art (HS92:250590) [30] 2017 einen Anteil am globalen Handelsvolumen von 528 Mio. USD [34]. Neben den Hauptexporteuren, den Niederlanden (19 %) und Deutschland (16 %), stellen Vietnam (6,4 %), China (5,4 %) und Jordanien (4,5 %) die Hauptexporteure im asiatischen Wirtschaftsraum [34]. Deutschland ist Nettoexporteur mit einem Wert von von 60,9 Mio. USD [34]. Der Anteil von Quarzsand (HS92:250510) [31] am globalen Handelsvolumen beträgt 705 Mio. USD (2017). Des Weiteren ist Deutschland nach Australien (15 %), den USA (12 %) und Belgien/Luxemburg (11 %) mit 8,9 % der viertgrößte Exporteur von Quarzsand (62,9 Mio. USD) und Nettoexporteur mit einem Wert von 32,5 Mio. USD (Stand 2017) [34].

2.2.4 Zement

Die globale Produktion von Zement betrug 4,7 Mrd. t im Jahr 2016, davon produzierte China 52 % [8]. Der USGS [46] gibt eine globale Zementproduktion von 4,1 Mrd. t in 2016 und 2018 an. Die globalen Reserven und Ressourcen von Kalkstein, dem Hauptbestandteil bei der Herstellung von Zement, sind groß und ein geologischer Mangel dieser Massenrohstoffe nicht absehbar [46]. In Deutschland werden ca. 34 Mio. t Zement pro Jahr mit einer Steigerung von 4 % zum Vorjahr produziert (Stand 2017) [52]. Zur Herstellung von Zement werden neben gemahlenem Kalkstein kieselsäure- und tonerdehaltige Zusatzstoffe benötigt, die bei Zugabe von Wasser schnell erhärtungsfähige Calciumsilikat- und -aluminat-Hydrate bilden. Diese hydraulischen Zusatzstoffe werden ebenfalls aus natürlichen Lagerstätten wie Ölschiefern, Ton(stei)nen, oder vulkanischen Gesteinen wie Trass (feinkörniger Tuff), oder aus Industrieabfällen wie Flugaschen gewonnen. Als latent-hydraulischer Zusatzstoff wird dem Zement fein gemahlener Hüttensand der glasig erstarrten Hochofenschlacke zugegeben, der mit den sulfatischen Anregern Gips oder Anhydrit, oder dem alkalischen Anreger Calciumhydroxid (gewonnen durch die Hydratation des Branntkalks) langsam verfestigt. Ein zunehmender Bedarf an Zusatzstoffen führt aufgrund des Rückgangs der Schwerindustrie und der Energiewende in Deutschland zu Problemen.

Hüttensande aus der Schlacke der Roheisenherstellung und insbesondere hochwertige Flugaschen aus der Steinkohle werden mittelfristig importiert oder substituiert werden müssen [15]. Im Jahr 2013 fielen 3,2 Mio. t Steinkohlenflugaschen in Deutschland an [3], die mit einem Anteil von 88 % in der Zement- und Betonindustrie Verwendung fanden [3]. Im Jahr

2018 wurde bereits nahezu die gesamte Flugasche zur Zementherstellung und im Betonbau verwendet [15].

Das globale Handelsvolumen an Zement (HS92:2523) [32] stieg von 4,7 Mrd. USD (1995) auf 9,1 Mrd. USD im Jahr 2017 [34]. Hauptexporteure sind China (7,3 %), die Türkei (6,8 %), Spanien (5,7 %) und Deutschland (5,3 %) (Stand 2017) [34,38]. Deutschlands Nettoexport betrug 2017 4,4 Mio. t (Stand 2017) [50]. Deutschland exportiert Zement im Wert von 480 Mio. USD und importiert Zement im Wert von 188 Mio. USD (Stand 2017) [34].

2.3 Geologische Verfügbarkeit und anthropogener Einfluss

2.3.1 Sand

Sand wird durch natürliche Erosion gebildet. Global werden mindestens 12 Mrd. t pro Jahr an Sedimentfracht als natürliche Erosion in die Weltmeere verbracht [42,53,54]. Durch den anthropogenen Einfluss mit Wald-Rodungen, durch Flussbegradigungen, sowie durch die Anlage großer landwirtschaftlicher Flächen u. a. nimmt die Erosion signifikant zu. So werden nach Wailling [53] bis zu 24 Mrd. t/a Sediment von Dämmen zurückgehalten. Wilkinson & McElroy [58] schließen auf natürlichen Stofftransport in Flüssen von 21 Mrd. t/a und zusätzliche anthropogen verursachte Erosionsraten von 75 Mrd. t/a. Somit liegt die natürliche Bildung von Sanden und Kiesen deutlich unterhalb des globalen Verbrauchs von 30-40 Mrd. t/a.

Die Qualität des Sands korreliert mit dessen Ablagerungsbedingungen. Geologisch wird zwischen äolischen (Windablagerungen), fluviatilen (Flussablagerungen) und marinen Sanden (Meeresablagerungen) unterschieden. Die homogene Sortierung und gute Rundung des äolischen Feinsandes verhindert ein Verzahnen der Quarzkörner. Diese kann bisher nur durch ein mechanisches Aufbrechen unter erhöhten Kosten, oder durch alternative Bindemittel für Wüstensand wie bspw. Polymerbeton erfolgen [60].

Im marinen Bereich abgebaute Sande zeigen gute Sortierung und einen schlechteren Rundungsgrad der Quarzkörner. Begleitminerale wie Tone erhalten den Kornverbund, mögliche Salzkristalle reduzieren allerdings die Qualität des Sandes und müssen ausgewaschen werden. Insbesondere gut sortierte fossile, also vor langer Zeit im marinen Randbereich abgelagerte und durch geologische Fluide überprägte, Sande werden wegen ihrer besonderen Reinheit in Deutschland als Glassande gewonnen. Für die Bauindustrie werden größtenteils fluviatil abgelagerte Sande und Kiese abgebaut. Auch gering verfestigte Sandsteine und Kiessteine werden aufgebrochen (Mürbsande) und als Sande und Kiese für die Bauindustrie verwendet.

2.3.2 Kalk

Kalke werden als chemische Ausfällung vorwiegend im marinen Raum um den Äquator bis zum 30. Breitengrad gebildet, und als Gestein in fossilen Lagerstätten gewonnen. Global werden derzeit etwa 3,5 Mrd. t/a Karbonat [37] in den Weltmeeren ausgefällt. Mit einem globalen Verbrauch von über 4 Mrd. t Kalkstein pro Jahr liegt der anthropogene Verbrauch über der derzeitigen, jährlichen globalen Bildung. Das globale Karbonat-Budget wird durch die globale Temperatur und natürliche Aufwärmung des Meereswassers wie durch El Niño beeinflusst. Perry & Morgan [35] zeigen, wie Korallen und damit große Rifffkörper durch Bleichung absterben. Diese können sich aber innerhalb von ca. 10 Jahren vollständig erholen, sofern nicht Massenvermehrungen von Seeigeln und anthropogene Einflüsse wie erhöhter Sedimenteintrag und Gewässer-Eutrophierung durch den Ausbau von Resorts sowie Überfischung stattfinden [35]. Durch den erhöhten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung organischer Rohstoffe wird ein Drittel des CO₂ in den Weltmeeren gelöst, sodass der pH-Wert der marinen Oberflächenwässer seit Beginn der industriellen Revolution um 26 % reduziert wurde [16]. Während das Wachstum von Algen und Seegras durch den erhöhten CO₂ Gehalt steigen sollte, werden Kalkschaler und Riffbildner durch das sauer werdende Meerwasser reduziert und der Kaskadeneffekt bleibt unklar [26].

Die in küstennahen Lagunen, Riffen, Vorriffen und Atollen gebildeten Karbonate zeigen, vergleichbar zu den Sanden unterschiedlicher Ablagerungsräume, abhängig vom Ablagerungsraum unterschiedliche Gesteinsqualitäten. Zwar wird die Kalksteinqualität durch unterschiedliche geologische Prozesse, wie chemische Änderungen durch beispielsweise den Einbau von Magnesium bei der Dolomitisierung, verschlechtert, dennoch sind die geologischen Reserven Deutschlands und auch global auf lange Zeit in ausreichender Menge verfügbar.

2.3.3 Gips

Evaporite wie Gips und Anhydrit werden durch Eindampfung in zeitweise abgeschlossenen und temporär mit Meereswasser überspülten Randbecken und in intrakontinentalen Senken ausgefällt. Dies geschieht vor allem in ariden Gebieten um den 30. Breitengrad, vergleichbare Gebiete finden sich aber auch bis zum Äquator und zur polaren Tundra (z. B. Anden, Himalaya). Gips wird für die Bauindustrie aus fossilen Lagerstätten, d. h. Steinbrüchen, als Festgestein abgebaut, und als Abfallprodukt bei der Rauchgasentschwefelung weiterverwendet. Aus diesen Produkten, die beispielsweise bei der Luftreinhaltung von Kohlekraftwerken freigesetzt werden, wird der sogenannte REA-Gips gewonnen, der knapp 20 % (Stand 2014)

der benötigten Gipsmengen bei der Zementherstellung deckt [50].

2.4 Qualitative Verfügbarkeit

Wegen des regionalen Mangels an Bausand wird Sand insbesondere von China vermehrt aus Spülungen im marinen Bereich gewonnen. Der Salzgehalt wird in der Regel nicht vollständig ausgewaschen, sodass die Lebenszeit der Bauwerke signifikant reduziert wird.

Im Gegensatz dazu hat Japan in den 1990er Jahren die Gewinnung von marinen Spülsanden verboten, was einen Einbruch der Sandindustrie um 60 % zur Folge hatte und die Entwicklung von M-Sand (manufactured sand) vorantrieb [21]. Japan führt Sand im Wert von 63,5 Mio. USD (Stand 2017) [34] ein, wovon allerdings fast 97 % Quarzsande sind, die zu 70 % aus Australien und knapp 10 % aus dem Vietnam stammen (Stand 2017) [34].

Gleichzeitig hat der erhöhte Anspruch an die Baustoffe einen erhöhten Anspruch an die Rohstoffqualität zur Folge.

2.5 Regionale Verfügbarkeit und nationale Politik

Obwohl die globale, geologische Verfügbarkeit von Massenrohstoffen auf lange Sicht gegeben ist, zeigen sich regional große Unterschiede im Zugang zu Baurohstoffen. Wirtschaftsstarke Kleinstaaten wie Singapur oder die Vereinigten Arabischen Emirate verzeichnen einen stetigen Bauboom, können den Bedarf mangels geologischer Verfügbarkeit aber nicht durch heimische Rohstoffe decken. Der Mangel führt zu intensivem und auch illegalen Abbau von Sand in benachbarten Ländern, was Länder wie Kambodscha im Jahr 2016, und zuvor Malaysia im Jahr 1997, sowie Indonesien im Jahr 2007 veranlasste, den Export von Bausanden nach Singapur einzuschränken bzw. zu beenden [2]. In den Medien wird der Begriff „Sandkrieg“ verwendet, aber bisher kann der Export von Bausanden beispielsweise aus Australien in die Vereinigten Arabischen Emirate den Ausfall der Importe aus anderen asiatischen Ländern ersetzen.

Auch in Schwellenländern wie bspw. Indien ist die Versorgung mit Sand nicht überall gegeben. So wird für manche Regionen der Sand durch Schlacke, Formsande aus den Gießereien, Bettasche aus der Kohleverbrennung oder durch andere industrielle Abfallstoffe substituiert, um den Bedarf an Sand und Beton zu decken [z. B. 36]. Der Verbrauch Indiens ist mit 0,7 t/p.c./a noch wesentlich geringer als der Chinas (3,4 t/p.c./a) [9], steigt aber auch kontinuierlich an. Wenn durch den Ausbau der Infrastruktur und des Hochbaus in Indien sich der Verbrauch von Baurohstoffen weiter auf den Stand entwickelter Länder von ca. 3 t/p.c./a entwickelt, ist bei einer Bevölkerung von fast 1,4 Mrd. Einwohnern der weiter zunehmende, globale Bedarf an Baurohstoffen absehbar.

Chinas Ausbau der Infrastruktur, seiner Urbanisierung und seine territoriale Ausdehnung mit dem Bau künstlicher Inseln benötigt mehr als die Hälfte der global produzierten Sande und Kiese [49]. Mindestens sieben künstliche Inseln von insgesamt 13 km² wurden von China auf Riffen im Südchinesischen Meer aufgeschüttet, die zu militärischen Basen ausgebaut wurden [44]. Damit soll der Zugang zu den reichen Fischbeständen, der Einfluss auf die globalen Handelsrouten [44] sowie auf die großen Kohlenwasserstoffvorkommen gesichert werden [11].

Solange die Politik den freien Welthandel der Rohstoffe gewährleistet [13] und das Innovationspotential fördert [14], ist weder von einer absoluten noch von einer relativen Knappheit auszugehen.³

2.5.1 Deutschland

Deutschland hat mit der norddeutschen Tiefebene, dem Rheingraben und dem Molassebecken große Sedimentbecken, in denen geologisch ausreichende Mengen von Sand und Kies im Verlauf der jüngeren Erdgeschichte abgelagert wurden, die den Bedarf langfristig decken würden. Hinzu kommen zahlreiche kleinere Vorkommen von Sanden und gering verfestigten Sandsteinen. Jedoch ist auch in Deutschland die regionale Verfügbarkeit beeinträchtigt. So sind in Baden-Württemberg rund 85 % aller bekannten Lagerstätten von Sand und Kies wegen Bebauung und Schutzgebieten für den Abbau nicht verfügbar [13]. In den Regionen Karlsruhe-Mannheim, Stuttgart, dem Ruhrgebiet und Berlin führt das bereits zu temporärem Mangel an Baurohstoffen, was sich in den nächsten Jahren bei weiterhin steigendem Baurohstoffbedarf noch verstärken wird [13].

2.6 Ökonomische Aspekte und Verfügbarkeit

Die heterogene Verteilung der Sand- und Kieslagerstätten in Deutschland hat für weiter entfernte Gebiete, die keinen Zugang zu Sand und Kies vor Ort haben, erhöhte Transportkosten zur Folge. Sofern eine Verschiffung mangels Lagerstätten an schiffbaren Flüssen ausbleibt, machen die Transportkosten per LKW den Sand nach ca. 50 km unwirtschaftlich [56]. Während eine Tonne Mauersand in Heinsberg 10 € netto kostet, sind in Kamen 17,50 € pro Tonne aufzuwenden. Für eine Lieferung von Kamen nach Bochum über knapp 50 km Distanz sind bereits 180 € zu veranschlagen. Des Weiteren bleibt der Ausbau von am Rhein gelegenen Sand- und Kieswerken aus, wodurch die Transportkosten erniedrigt und die Versorgungsdistanz erhöht werden könnte. Allein in Baden-Württemberg hat sich die Anzahl der Kieswerke am mittleren Oberrhein von 60 im Jahre 1992 auf 35 im Jahre 2014 verringert und wird nach aktuellen Schätzungen 2045 nur noch bei 20 liegen [4].

Mit den erhöhten Preisen für Bauland geht auch ein starker Anstieg der Preise von Ackerland einher.

Zwar ist der Anstieg abhängig von der Region unterschiedlich, jedoch ist der gemittelte Verkaufspreis Ackerland in Baden-Württemberg mit 26.800 €/ha um 10 % zum Vorjahr gestiegen (Stand 2017) [40]. Bei steigenden Preisen und einem zunehmenden Mangel an Ackerland hat der Wille der Eigentümer, landwirtschaftliche Fläche für den Rohstoffabbau zu veräußern, stark abgenommen [13].

2.7 Gesetzliche Aspekte und Verfügbarkeit

Den illegalen Sand-Abbau versucht man auf allen Kontinenten mit gesetzlichen Maßnahmen einzuschränken. In Marokko sind 10 Mio. t, die Hälfte des Bausandes des Landes, durch illegale Entnahme an den Küsten zu verzeichnen [48]. Neben dem illegalen Abbau gingen zahlreiche Regierungen Afrikas wie Botswana und Südafrika mit gesetzlichen Maßnahmen gegen den illegalen Abbau der Sand-Mafia vor.

In Deutschland ist die Planung für Baurohstoffe unsicher. So erfolgte etwa im Gebiet des Mittleren Oberrheins in Baden-Württemberg trotz geologischer, abbauwürdiger Vorkommen seit über 30 Jahren keine Neugenehmigung eines weiteren Sand- und Kies-Abbaus wegen konkurrierender Raumnutzung, vorgegebener Schutzabstände zu vorhandener Infrastruktur, Natur- und Wasserschutzgebieten und Fehlen von Ersatzflächen zu vorgeschriebenen Ausgleichsmaßnahmen [4].

2.8 Umweltaspekte und Verfügbarkeit

Umwelteinwirkungen sind durch den illegalen Abbau von Sand auf allen Kontinenten zu beklagen. Kalksteine und Gips verzeichnen wegen des technischen Aufwands beim Abbau, wenn überhaupt, einen geringen Anteil an unerlaubter Gewinnung von Baurohstoffen. Nur die europäischen und nordamerikanischen Richtlinien zeigen nachhaltige Rohstoffproduktion auf.

Der illegale Abbau von Strandsand führt zu Kaskadenwirkungen wie erhöhter Küstenerosion. Bei nachgelagertem illegalen Abbau wandern Salzwasserfahnen in die Grundwässer, es kommt zu Bodensenkungen mit höheren Risiken für Überflutungen, und in entsprechenden Klimaten zu Gesundheitsgefahren wie Malaria in neu gebildeten, stehenden Gewässern [43].

Gleichzeitig investieren viele entwickelte Länder in Sandvorspülungen in den Küstengebieten. Durch die Bevölkerungszunahme der letzten 200 Jahre wurden zunehmend risikobehaftete, strandnahe Gebiete besiedelt und durch effizienten Deichbau große Gebiete urbar gemacht. Für den dadurch bedingten Küstenschutz wurden allein in Sylt seit 1972 rund 50 Mio. m³ Sand für ca. 228 Mio. € vorgespült, weitere 1,2 Mio. m³ für 6,5 Mio. € kommen 2019 hinzu [25]. Insgesamt werden in Deutschland etwa 2,5 Mio. t Sand pro Jahr vorgespült (Stand 2016) [13]. Derzeit

wird untersucht, ob die in den vorgespülten Sanden der Ostsee enthaltenen Schwerminerale, insbesondere Zirkon, als wirtschaftsstrategischer High-Tech Rohstoff abgetrennt und die darin enthaltenen Seltenen Erden umweltfreundlich gewonnen werden können [10].

Der Umwelteinfluss der Vorspülungen wird nur selten berücksichtigt. Neben einem Eingriff in Meeres-Flora und -Fauna werden die Sanddepots auf dem Meeresgrund geringer, weil die vorgespülten Sande, die bis zu 10-mal schneller erodiert werden als die natürlichen Strandsande, auch weiter ins Meer hinaustreiben [7]. Dies kann zu massiven Suspensionen von Sedimentfracht im Meerwasser führen, die sich küstenfern bspw. auf Korallen ablagern und zu deren Absterben führen können [55].

Der legale Abbau von Baurohstoffen in Deutschland erfolgt in enger Zusammenarbeit von Behörden, Unternehmen, Rohstoff- und Umweltverbänden. Der Abbau geht mit einer Änderung der Flora und Fauna einher, die den Lebensraum von Arten temporär zerstört, und gleichzeitig neuen Lebensraum für andere Arten schafft [6]. So wird von einer Besiedlung von 90 % der Uhus und 94 % der Uferschwalben in Felswänden und Sandböschungen in aktiven Steinbrüchen der Wallonie Belgiens berichtet [49]. Auch die Rekultivierung erfolgt nach engen Richtlinien, wobei im Sinne des Naturschutzes einer Renaturierung Vorzug eingeräumt wird [6].

3 Schlussfolgerung

Der globale und nationale Bedarf von Baurohstoffen steigt kontinuierlich an. Beton, und damit die benötigten Ausgangsstoffe Kalk- und Tonstein, Sande und Kiese sowie Gips und Anhydrit, ist der führende Baustoff.

Die Baurohstoffe sind zwar aus geologischer Sicht unbegrenzt vorhanden, ihre Verfügbarkeit ist aber durch Unterschiede in der regionalen Verteilung sowie durch politische, ökonomische, umwelt- und gesetzliche Aspekte begrenzt. Weitere Einschränkungen sind durch die höheren Ansprüche an die Rohstoffqualitäten zu erwarten.

Der Anteil an Recycling-Baustoffen muss weiter steigen, um der globalen Nachfrage nachzukommen. Eine alleinige Fokussierung auf Recycling wird den nationalen und globalen Bedarf jedoch nicht decken können, da Ansprüche an die Rohstoffqualität steigen, die benötigten Volumina steigen und die Lebenszeit von Gebäuden und damit die Verfügbarkeit der darin verbauten Rohstoffe zu langfristig ist, um durch Abriss der steigenden Anzahl von Neubauten nachzukommen.

Um die Verfügbarkeit von Baurohstoffen zu gewährleisten, müssen frühzeitig mögliche Neu- oder

Wiedereröffnungen, sowie Erweiterungen von Abbauflächen geprüft und langwierige Genehmigungsverfahren effizient gestaltet werden.

Weitere Innovationen beim Abbau und Produktion, beim Bau und Recycling können auch zukünftig die Natureingriffe effizienter gestalten, die begleitet von politischen und gesetzlichen Maßnahmen die Rohstoffverfügbarkeit langfristig sicherstellen.

4 Literatur

- [1] Baunetz Wissen (2019), <https://www.baunetz-wissen.de/beton/fachwissen/herstellung/wasserzementwert-150934>, assessed 06/2019.
- [2] BBC (2017) Cambodia bans sand exports permanently. <https://www.bbc.com/news/business-40590695>, assessed 19.5.2019.
- [3] BBS (2016) Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland, Studie Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V., 50 pp.
- [4] Benzel, L., (2019) Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton. Fachvortrag 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie, 14. März 2019.
- [5] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2017a) Deutschland - Rohstoffsituation 2016. Hannover, 190 pp.
- [6] BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2017b) Heimische mineralische Rohstoffe - unverzichtbar für Deutschland!. ISBN: 8-3-943566-80-2, 84 pp.
- [7] Blasberg, M., Henk, M., (2014) Wie Gold am Meer, Die Zeit, Nr. 34, <https://www.zeit.de/2014/34/strand-sand-verschwinden>, assessed 20.5.2019.
- [8] Cembureau (2017) Activity report 2017. 48 pp.
- [9] Chilamkurthy, K., Marckson, A.V., Chopperla, S.T., Santhanam, M. 2016. A statistical overview of sand demand in Asia and Europe. CTMC conference, 15 pp.
- [10] CUTEK (2018) Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe - Zwischenergebnisse. 120 pp.
- [11] Daiss, T., (2019) South China Sea Energy Politics Heat Up Oil Price, <https://oilprice.com/Geopolitics/Asia/South-China-Sea-Energy-Politics-Heat-Up.html>, assessed 19.5.2019.

- [12] Dill, H.G., Röhling, S. (2007) Bodenschätze der Bundesrepublik Deutschland (BSK 1000) 1: 1.000.000.- 1 Karte, Hannover.
- [13] Elsner, H., (2018) Sand – auch in Deutschland bald knapp?. BGR Commodity top News, Vol. 56, 7 pp.
- [14] Fraunhofer-ISI (2005) Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht Forschungsprojekt 09/05 BMWi, 350 pp.
- [15] Heinz, D., Heisig, A., (2018) Flugasche und Hütensand – Zusatzstoffe mit Zukunft?, in Nolting, U., Dehn, F., Haist, M., Link, J., Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen, Tagungsband 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018, 108 pp.
- [16] IGBP, IOC, SCOR (2013) Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden.
- [17] Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., (2009) Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, Vol. 68(10), p. 2696-2705. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.
- [18] Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H., Haberl, H., (2017) Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 114 (8), p. 1880-1885; doi:10.1073/pnas.1613773114.
- [19] Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D., (2018) From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change*, Vol. 52, p. 131-140, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- [20] Landtag (2018) Antwort des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft auf die Anfrage des Abg. Fabian Gramling zu Mineralische Rohstoffe in Baden-Württemberg. Drucksache 16 / 4174, 5 pp.
- [21] Lusty, A., (2013) Manufactured sand for tomorrow. NZ Concrete Industry Conference Queenstown, 8 pp.
- [22] Lutz, W., Samir, K.C., (2010) Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 365(1554), p. 2779-2791, doi:10.1098/rstb.2010.0133.
- [23] Miatto, A., Schandl, H., Fishman, T., Tanikawa, H. (2016) Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. *Journal of Industrial Ecology* Vol. 21(4), p. 924-937, doi: 10.1111/jiec.12471.
- [24] More, E., Probert, D., Phaal, R., (2015) Improving Long-Term Strategic Planning: An Analysis of STEEPLE Factors Identified in Environmental Scanning Brainstorms. *Proceedings of PIC MET '15: Management of the Technology Age*, p. 381-394.
- [25] NDR (2019) Küstenschutz: Albrecht begutachtet Strand auf Sylt. <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Kuestenschutz-Albrecht-begutachtet-Strand-auf-Sylt,sylt1146.html>, assessed 19.5.2019.
- [26] NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration (2019) What is oceanic acidification?. <https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification%3F>, assessed 3.6.2019.
- [27] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Gypsum HS92:2520, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2520/>, assessed 05/2019.
- [28] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Kalkstein HS92:2521, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2521/>, assessed 05/2019.
- [29] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Sand HS92:2505, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2505/>, assessed 05/2019.
- [30] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Natursande aller Art HS92:250590, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/250590/>, assessed 05/2019.
- [31] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Quarzsand HS92:250510, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/250510/>, assessed 05/2019.

- [32] Observatory of Economic Complexity (OEC), HS data BACI International Trade Database, Zement HS92:2523, <https://atlas.media.mit.edu/de/profile/hs92/2523/>, assessed 05/2019.
- [33] OECD (2018) Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- [34] OES (2019) The Observatory of Economic Complexity, <https://atlas.media.mit.edu/en/>, assessed 05/2019.
- [35] Perry, C.T., Morgan, K.M., (2017) Bleaching drives collapse in reef carbonate budgets and reef growth potential on southern Maldives reefs. *Nature Scientific Reports*, Vol. 7:40581, doi:10.1038/srep40581.
- [36] Sankh, A.C., Biradar P.M., Naghathan, S.J., Ishwargol, M.B., (2014) Recent Trends in Replacement of Natural Sand With Different Alternatives. *International Conference on Advances in Engineering & Technology - 2014 (ICAET-2014)*, p. 59-66.
- [37] Schneider, R.R., Schulz, H.D., Hensen, C., (2000) Chapter 9: Marine carbonates: Their formation and destruction. In: Schulz, H.D., Zabel, M. (eds): *Marine Geochemistry*. Springer, Berlin, p. 283-307.
- [38] Simoes, A.J.G., Hidalgo, C.A., (2011) The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development. *Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
- [39] Statista (2019) <https://www.statista.com/statistics/657049/production-of-lime-worldwide/>, assessed 06/2019.
- [40] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018) Kaufpreise für landwirtschaftliche Flächen 2017 wieder gestiegen – Leichter Rückgang in 2016 mehr als ausgeglichen. *Pressemitteilung 188/2018*.
- [41] Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner, B.L., Wasson, R.J., (2004) *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-40800-2, doi:10.1007/b137870, 336 pp.
- [42] Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., Green, P., (2005) Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, Vol. 308(5720), p. 376-380, doi:10.1126/science.1109454.
- [43] Torres, A., Brandt, J., Lear, K., Liu, J., (2017) A looming tragedy of the sand commons. Increasing sand extraction, trade, and consumption pose global sustainability challenges. *Science*, Vol. 357, p. 970-971.
- [44] Tweed, D. (2018) Why the South China Sea Fuels U.S.-China Tensions. *Bloomberg Businessweek*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-10-07/why-the-south-china-sea-fuels-u-s-china-tensions-quicktake>, assessed 19.5.2019.
- [45] U.S. Geological Survey (2018) Mineral commodity summaries 2018: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70194932>.
- [46] U.S. Geological Survey (2019) Mineral commodity summaries 2019. U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70202434>.
- [47] UN, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017) *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP/248, 53 pp.
- [48] UNEP (2016) *Global Material Flows and Resource Productivity. An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel*. H. Schandl, M. Fischer-Kowalski, J. West, S. Giljum, M. Dittrich, N. Eisenmenger, A. Geschke, M. Lieber, H. P. Wieland, A. Schaffartzik, F. Krausmann, S. Gierlinger, K. Hosking, M. Lenzen, H. Tanikawa, A. Miatto, and T. Fishman. Paris, United Nations Environment Programme, ISBN: 978-92-807-3554-3, 200 pp.
- [49] UNEP 2019. *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- [50] Verein Deutscher Zementwerke (2014) *Rohstoffgewinnung und -einsatz in der deutschen Zementindustrie*. Information Rohstoffe, Verein Deutscher Zementwerke e.V., 4 pp.
- [51] Verein Deutscher Zementwerke (2018) *Zementindustrie im Überblick 2018/2019*. Verein Deutscher Zementwerke Berlin, 2018, 36 pp.
- [52] Verein Deutscher Zementwerke (2019) *Zahlen und Daten*. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/>, assessed 05/2019.
- [53] Walling, D.E., (2015) The changing suspended sediment loads of the world's rivers and implications for land-ocean sediment fluxes. 45. *Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA) RWTH Aachen*, 21 pp.

- [54] Walling, D.E., Webb., B.W. (1996) Erosion and sediment yield: a global overview. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, Vol. 236, p. 3-20.
- [55] Wanless, H.R., Maier, K.L., (2014) An evaluation of beach renourishment sands adjacent to reefal settings, Southeast Florida. Southeastern Geology, Vol. 45, p. 25-42.
- [56] Welt (2019) In Deutschland wird der Sand knapp. Die Welt, 13.02.2019, assessed 26.5.2019.
- [57] Weltbank (2018) Weltbank
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2017&start=1967&view=chart>, accessed 5/2019.
- [58] Wilkinson, B.H., McElroy, B.J. (2007) The impact of humans on continental erosion and sedimentation. Geological Society of America Bulletin, Vol. 119.1-2, p. 140-156.
- [59] WIN (2018) Produktinformation REA-Gips. Wirtschaftsverband mineralische Nebenprodukte e.V., 5 pp.
- [60] Zimmermann, M. (2019) Legosteine aus Wüstensand könnten die Zukunft des Bauens sein. Augsburger Allgemeine, 13.2.2019, <https://www.augsburger-allgemeine.de/kultur/Journal/Legosteine-aus-Wuestensand-koennten-die-Zukunft-des-Bauens-sein-id53423601.html>.

Autoren

Prof. Dr. Christoph Hilgers

Institut für Angewandte Geowissenschaften,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
Baden-Württemberg

RohstoffWissen e.V. –
Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur
Lessenicher Straße 1
53123 Bonn

Dr. Ivy Becker

Institut für Angewandte Geowissenschaften,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
Baden-Württemberg